



HAL
open science

Éléments Pour Une Interprétation Classique de la Mécanique Quantique

Stéphane Le Corre

► **To cite this version:**

Stéphane Le Corre. Éléments Pour Une Interprétation Classique de la Mécanique Quantique. 2021.
hal-03334412v3

HAL Id: hal-03334412

<https://hal.science/hal-03334412v3>

Preprint submitted on 14 Sep 2021 (v3), last revised 4 Nov 2021 (v5)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Éléments Pour Une Interprétation Réaliste et Classique de la Mécanique Quantique

Stéphane Le Corre, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Route Cantonale, 1015 Lausanne

Introduction

La mécanique quantique (MQ) est une théorie qui fonctionne exceptionnellement bien mathématiquement mais qui pose des problèmes d'interprétation physique [1]. Ainsi il est par exemple difficile de fournir une interprétation physique à la fonction d'onde ainsi qu'à la non-localité de la mécanique quantique démontrée dans les expériences EPR [2] (car jusqu'à ce jour elle implique nécessairement une transmission d'information instantanée ou du moins supérieure à la vitesse de la lumière). Dans cet article, nous allons démontrer la possibilité d'expliquer physiquement des expériences EPR qui violent effectivement les inégalités de Bell grâce à une simulation numérique. Cette solution va permettre de comprendre la violation de ces inégalités, de réinterpréter les résultats expérimentaux des expériences EPR (notamment des échappatoires qui prendront un sens nouveau), de fournir un nouveau regard sur la non-localité de la mécanique quantique (sans avoir recours à des transmissions d'informations supraluminiques) et potentiellement des éléments embryonnaires plus généraux d'interprétation de la MQ.

Nous commencerons par décrire les principes de la simulation proposée. Nous simulerons ensuite quelques expériences basiques de mécanique quantique pour valider notre modèle. Nous continuerons par la simulation des expériences de type EPR. Nous finirons par une analyse des éléments fondamentaux de notre modélisation.

Expérience EPR

Description de l'expérience

La simulation (expérience virtuelle) que nous allons proposer va permettre d'obtenir une violation systématique des inégalités de Bell. Contrairement aux théories à variables cachées, classiquement prévue pour ne pas violer ces inégalités (i.e. ne pas dépasser une valeur de 2), dans notre modèle, nous ne pourrions avoir que des valeurs supérieures à 2 (la violation prévue par la MQ étant d'environ 2.83). Voici le schéma de principe qui correspond à l'expérience EPR idéale que nous allons modéliser et simuler :

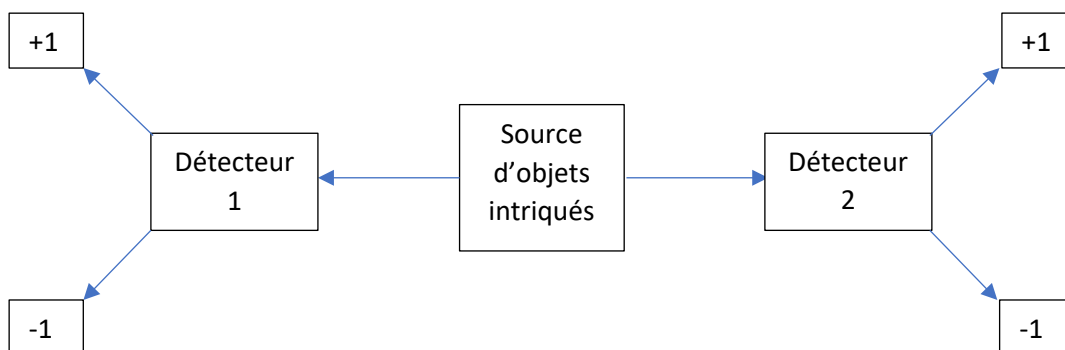


Fig.1 : Schéma de principe de l'expérience EPR idéale modélisée dans cette étude

Description de la source

Dans le cadre de notre simulation, la source va correspondre à la génération aléatoire non pas d'une direction mais d'un couple de directions quelconques. Chaque direction sera caractérisée par un angle compris entre 0° et 180° . Nous définirons tous ces angles par rapport à un référentiel absolu. La longueur du segment portant cette direction n'a pas d'importance dans notre expérience. On peut la supposer égale à 1. On peut ainsi représenter nos objets sources sous la forme de croix aux branches plus ou moins écartées (cf. Fig.2), les branches correspondant à des diamètres.

1^{ère} Remarque importante : Le fait que la source fournisse 2 caractéristiques pour un même objet source est le 1^{er} point important de cette modélisation. Nous le verrons plus loin, c'est certainement la clé de voûte de cette classe de modélisation.

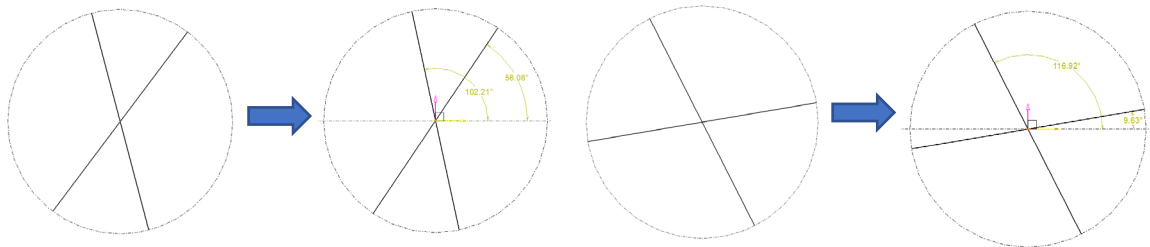


Fig.2 : Objets sources. Les angles indiqués correspondent aux angles des 2 directions par rapport au référentiel absolu

Description du détecteur

Un détecteur consistera symboliquement en 1 cercle divisé en 4 secteurs de 90° chacun (cf Fig.3) défini sur un référentiel fixé sur ce cercle. Les 4 secteurs dans ce référentiel sont donc toujours compris entre 0° et 90° pour le 1^{er} secteur, 90° et 180° pour le 2nd, 180° et 270° pour le 3^{ème} et 270° et 360° pour le 4^{ème}. On attribuera une valeur +1 au 1^{er} et 3^{ème} secteur et une valeur -1 au 2^{ème} et 4^{ème} secteur. Cette valeur va servir à définir la valeur de sortie du détecteur. L'orientation du détecteur sera définie dans le référentiel absolu mentionné auparavant (i.e. le même que pour les objets sources) par l'angle de son axe noté « 0° » sur la fig.3. Le détecteur analysera les 2 directions de l'objet source en appliquant la règle suivante :

Si les 2 directions de l'objet source se situent dans un ou deux secteurs de même valeur, le détecteur fournit en sortie la valeur du ou des secteurs.

2^{ème} Remarque importante : Cette règle permet à toute orientation du détecteur de fournir une valeur. Par contre, comme on peut le remarquer, cela signifie aussi que certains objets sources pourront ne pas fournir de valeur (ceux dont les directions se trouvent dans 2 secteurs différents) donc ne pas être détectés. Il s'agit là du 2nd point crucial de notre modélisation (conséquence directe de la « 1^{ère} Remarque importante » précédente).

Etant donné que les non détections sont certainement le point le plus délicat au 1^{er} abord à accepter, nous leur consacrerons un chapitre dédié dans lequel nous montrerons qu'elles :

- Sont impossibles à éviter
- Ne peuvent correspondre non plus à une 3^{ème} valeur (qui compléterait les sorties possibles « +1 » et « -1 »)
- Sont d'un autre type que les échappatoires des expériences EPR réelles

Les 2 remarques importantes précédentes seront les caractéristiques fondamentales de la classe de modélisation représentée par le modèle que nous allons étudier. Mais continuons de décrire notre modélisation.

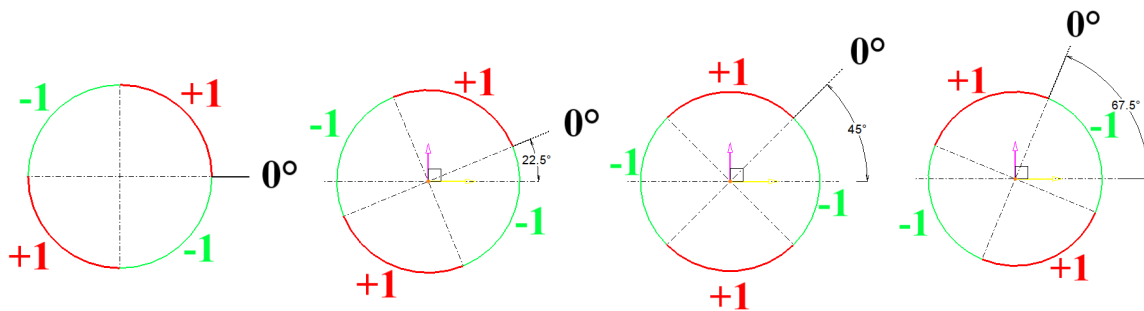


Fig.3 : Détecteurs. Division en 4 secteurs pouvant donner les valeurs de détection « +1 » ou « -1 ». Les exemples d'angles indiqués (22.5°, 45° et 67.5°) correspondent aux angles du détecteur par rapport au référentiel absolu.

Modélisation numérique de la source

Nos objets sources se réduisent à la connaissance d'un couple de direction. Pour cela, on déterminera la 1^{ère} direction du couple en choisissant aléatoirement un 1^{er} angle entre 0° et 180° par rapport au référentiel absolu. On choisira ensuite aléatoirement un second angle entre 0° et 180° pour déterminer l'écart de la 2^{nde} direction à la 1^{ère} direction. Ce second angle sera donc ajouté à l'angle de la 1^{ère} direction pour définir la 2^{nde} direction. On aurait très bien pu directement définir le 2nd angle de la même manière que la 2^{nde} direction (et cela n'aurait rien changé aux résultats présentés dans cet article). Nous définissons le 2nd élément du couple plutôt comme l'écart à la 1^{ère} direction car nos expériences vont montrer que l'écartement est un paramètre structurant de notre modélisation. En effet, les différentes valeurs de violation des inégalités de Bell seront fonction de ce paramètre. Cette représentation du couple sera donc plus pertinente. De plus, cela nous permettra une interprétation physique de ces objets sources à la fin de cet article.

Concrètement, on définit un angle d'évasement maximal *SpacMax* pour l'expérience en cours, ensuite pour chaque essai, le 2nd angle (l'évasement) sera choisi aléatoirement dans l'intervalle [0° ; *SpacMax*]. C'est ce paramètre *SpacMax* qui sera structurant pour obtenir toute une variété de valeur de violation des inégalités de Bell. L'évasement maximal *SpacMax* pourra être choisi entre 0° et 180°. On pourrait très bien définir un même évasement fixe pour toute l'expérience, autrement dit chaque objet source aurait 2 directions avec toujours le même écart et seule la direction de ce couple changerait à l'émission. On obtiendrait alors à nouveau systématiquement la violation des inégalités de Bell., Nous ne faisons pas ce choix pour cette présentation, car comme on le verra plus loin, même si l'on retrouve les résultats attendus par la MQ, la modélisation donnent des courbes qui paraissent légèrement moins bonnes que celles obtenues avec un évasement maximal (et non fixe).

Commençons d'abord par vérifier les statistiques attendues d'expériences de base.

Expérience avec 1 détecteur dont l'orientation est aléatoire à chaque essai (cf. fichier « 01-UN Détecteur orienté aléatoirement.xlsx ») :

Concrètement, voici l'implémentation de l'orientation du détecteur (colonne D) et de la définition des objets sources, 1^{ère} direction (colonne E) et écartement (colonne F) dans un tableur. La ligne 1 donne les formules utilisées :

	A	B	C	D	E	F
1	Valeur maximale de l'évasement		Comptage du nombre d'essais	ALEA()*180	ALEA()*180	MOD(E3+ALEA()*\$A\$3;180)
2	Evasement max		Nb Essai	Angle Detecteur1 / Ref Abs	Sablier Angle Bord Droit / Ref Abs	Sablier Angle Bord Gauche / Ref Abs
3	0		1	170.937523	166.2141571	166.2141571

Tab.1

Le rôle du modulo (dans la définition de la 2^{nde} direction, colonne F) est de fournir une définition du couple dans le demi-cercle supérieur. Lorsque l'angle définissant la 2^{nde} direction (somme de l'angle définissant la position de la 1^{ère} direction et de l'écartement) dépasse les 180°, la 2^{nde} direction (trait rouge avant modulo sur la Fig.4) se définit alors par sa demi-droite (trait bleu après modulo) contenue dans le demi-cercle supérieur (Fig.4) :

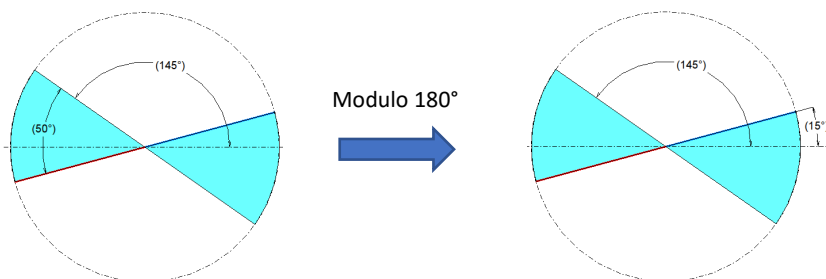


Fig.4 : L'objet source défini par (145° ; 145°+50°=195°) est redéfini par (145° ; 15°).

Ainsi tout couple de direction a 2 manières de se définir, par exemple (1^{ère} dir=145° ; Ecart=50°) qui sera traduit en (1^{ère} dir=145° ; 2^{nde} dir=15°) ou (1^{ère} dir=15° ; Ecart=130°) qui se traduit en (1^{ère} dir=15° ; 2^{nde} dir=145°). Ce « doublonnage » n'a pas de conséquence sur les statistiques car il est partagé par tous les objets sources.

Pour l'analyse dans le détecteur, nous convertissons les 2 directions de l'objet source dans le référentiel du détecteur (colonne G et colonne H) en retirant l'orientation du détecteur (l'axe 0° de la Fig.3). Ensuite, nous regardons dans quels secteurs ces 2 directions se trouvent pour obtenir le résultat « +1 » ou « -1 » (colonne I) qui correspond à la règle mentionnée précédemment. L'implémentation utilisée est indiquée en ligne 1 :

G	H	I
MOD(E3-D3;180)	MOD(F3-D3;180)	SI(ET(G3<90;H3<90);1;SI(ET(G3>90;H3>90);-1;""))
Sablier Angle Bord Droit / Detecteur1	Sablier Angle Bord Gauche / Detecteur1	Resultat
175.276634	175.276634	-1

Tab.2

Pour analyser les résultats du détecteur, nous comptons séparément les « +1 » (colonne J et O), les « -1 » (colonne K et P) et le nombre d'évènements détectés, i.e. donnant un résultat (colonne N). Pour information, nous comptons aussi le nombre d'essais (colonne L) et le nombre d'évènements non-détectés (colonne M). En voici l'implémentation :

J	K	L	M	N	O	P
SI(I3=1;1;"")	SI(I3=-1;1;"")	SOMME(C:C)	L3-N3	SOMME(J:K)	SOMME(J:J)/N3	SOMME(K:K)/N3
Nb résultat "+1"	Nb résultat "-1"	Nb Essai	Nb Evt Non-Det	Nb Evènement Détecté	Probabilité d'avoir un résultat "+1"	Probabilité d'avoir un résultat "-1"
	1	5500	0	5500	0.499818182	0.500181818

Tab.3

Pour un choix aléatoire de l'orientation du détecteur, nous obtenons toujours une probabilité de 0.5 d'avoir « +1 » et 0.5 d'avoir « -1 » et quelque soit la plage d'évasement des directions (Tab.4) en accord avec les résultats attendus de la MQ :

Evasement max	Nb Evt Non-Det	Nb Evènement Détecté	Evasement max	Probabilité d'avoir un résultat "+1"	Probabilité d'avoir un résultat "-1"	% Evt Non-Det	% Evènement Détecté
0	0	5500	0	0.492	0.508	0	1
10	295	5205	10	0.51162344	0.48837656	0.05363636	0.94636364
20	605	4895	20	0.513381	0.486619	0.11	0.89
30	932	4568	30	0.51050788	0.48949212	0.16945455	0.83054545
40	1268	4232	40	0.50047259	0.49952741	0.23054545	0.76945455
50	1521	3979	50	0.49208344	0.50791656	0.27654545	0.72345455
60	1839	3661	60	0.49685878	0.50314122	0.33436364	0.66563636
70	2127	3373	70	0.49747999	0.50252001	0.38672727	0.61327273
80	2457	3043	80	0.49687808	0.50312192	0.44672727	0.55327273
90	2762	2738	90	0.49671293	0.50328707	0.50218182	0.49781818
100	3016	2484	100	0.50322061	0.49677939	0.54836364	0.45163636
110	3161	2339	110	0.48140231	0.51859769	0.57472727	0.42527273
120	3304	2196	120	0.48679417	0.51320583	0.60072727	0.39927273
130	3241	2259	130	0.50110668	0.49889332	0.58927273	0.41072727
140	3127	2373	140	0.49093974	0.50906026	0.56854545	0.43145455
150	3133	2367	150	0.50443599	0.49556401	0.56963636	0.43036364
160	3049	2451	160	0.48959608	0.51040392	0.55436364	0.44563636
170	2905	2595	170	0.49325626	0.50674374	0.52818182	0.47181818
180	2720	2780	180	0.50359712	0.49640288	0.49454545	0.50545455

Tab.4

Expérience avec 1 détecteur dont l'orientation est fixe à chaque essai (cf. fichier « 02-UN Détecteur orienté selon UNE direction.xlsx ») :

Nous obtenons les mêmes résultats si l'orientation du détecteur est fixe pour tous les essais (Tab.5) en accord avec les résultats attendus de la MQ :

Evasement max	Nb Evt Non-Det	Nb Evènement Détecté	Probabilité d'avoir un résultat "+1"	Probabilité d'avoir un résultat "-1"	% Evt Non-Det	% Evènement Détecté
0	0	5500	0.49290909	0.50709091	0	1
10	323	5177	0.50222136	0.49777864	0.05872727	0.94127273
20	608	4892	0.50122649	0.49877351	0.11054545	0.88945455
30	889	4611	0.50054218	0.49945782	0.16163636	0.83836364
40	1173	4327	0.49965334	0.50034666	0.21327273	0.78672727
50	1547	3953	0.48874273	0.51125727	0.28127273	0.71872727
60	1867	3633	0.50068814	0.49931186	0.33945455	0.66054545
70	2146	3354	0.50119261	0.49880739	0.39018182	0.60981818
80	2457	3043	0.49983569	0.50016431	0.44672727	0.55327273
90	2718	2782	0.50611071	0.49388929	0.49418182	0.50581818
100	3017	2483	0.50302054	0.49697946	0.54854545	0.45145455
110	3094	2406	0.52036575	0.47963425	0.56254545	0.43745455
120	3233	2267	0.5094839	0.4905161	0.58781818	0.41218182
130	3244	2256	0.47916667	0.52083333	0.58981818	0.41018182
140	3212	2288	0.50568182	0.49431818	0.584	0.416
150	3047	2453	0.51773339	0.48226661	0.554	0.446
160	3055	2445	0.49570552	0.50429448	0.55545455	0.44454545
170	2920	2580	0.48139535	0.51860465	0.53090909	0.46909091
180	2730	2770	0.50216606	0.49783394	0.49636364	0.50363636

Tab.5

L'avantage d'une simulation numérique d'une expérience EPR est que l'on peut étudier les évènements non-détectés. Sur la Fig. 5, on a indiqué le nombre d'évènements non-détectés et détectés pour les comparer. On notera, comme nous en discuterons plus loin, que tant que l'évasement n'est pas nul, on obtient toujours des non-détections. Comme nous le verrons plus loin, ces non-détections ne sont pas de même nature que les échappatoires des résultats expérimentaux :

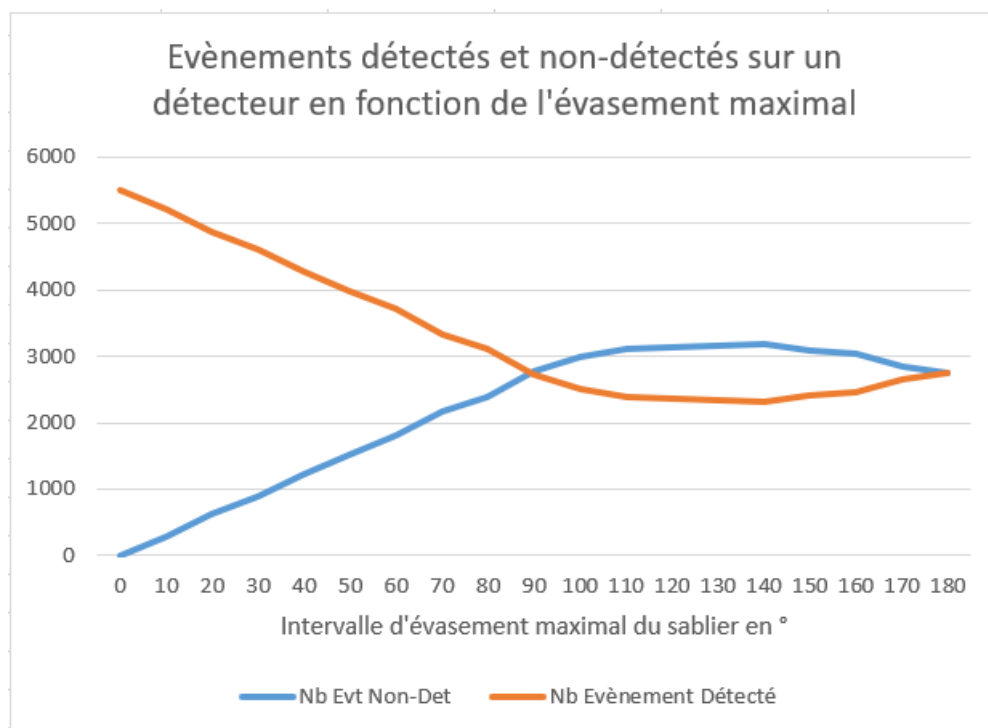


Fig.5 : Comparaison de la cardinalité des ensembles d'évènements détectés et non détectés.

Expérience avec 2 détecteurs, un à orientation fixe et un dont l'orientation varie (cf. fichier « 03-DEUX Détecteurs orientés selon DEUX directions.xlsx ») :

Un autre avantage d'une simulation numérique est que les objets détectés ne sont ni détruits ni modifiés. Nous pouvons donc les analyser à nouveau après une 1^{ère} détection. Sur la Fig.6, nous avons d'abord fait passer les objets sources dans un 1^{er} détecteur et ensuite nous avons fait passer dans un 2nd détecteur seulement ceux qui avait donné le résultat « +1 ». Ce même ensemble d'objet source donnant « +1 » a été redirigé sur différent 2nd détecteur pour analyser cet ensemble en fonction de l'orientation d'un détecteur. C'est comme si on démultipliait le photon détecté dans son état initial pour que ce même photon soit étudié sur plusieurs détecteurs d'orientation différente :

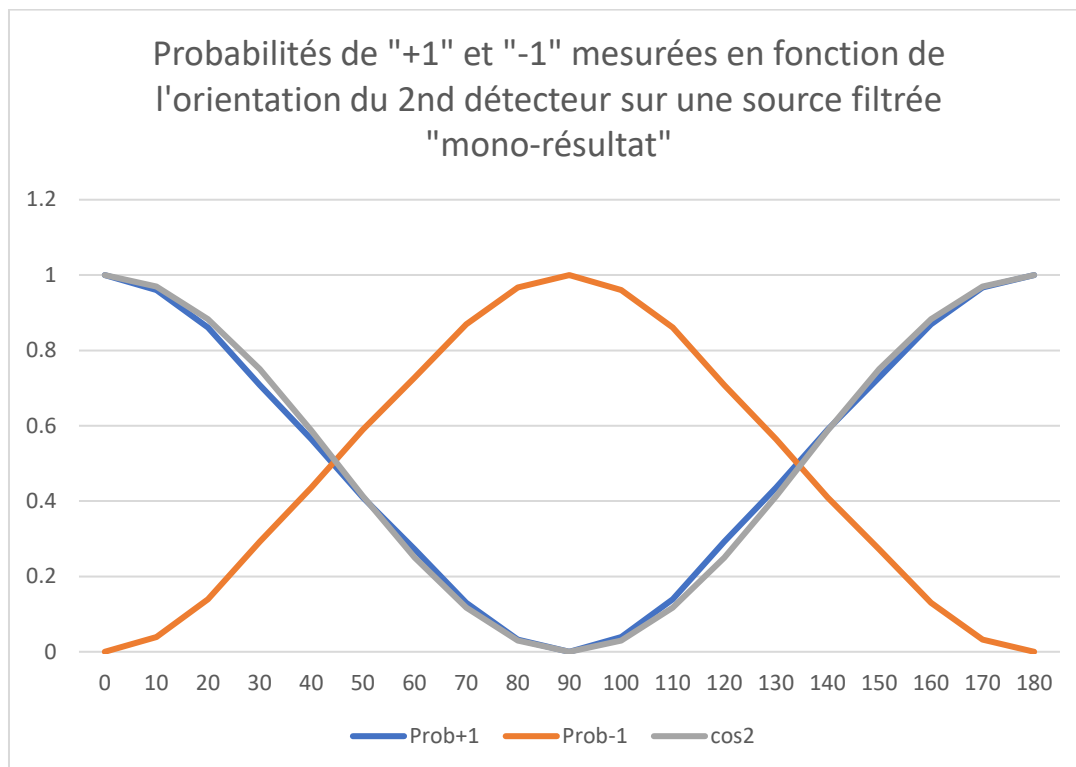


Fig.6 Probabilités issues de notre simulation sur un détecteur, à partir d'un ensemble source préalablement filtrée sur la valeur « +1 » (après passage par un 1^{er} détecteur), comparées à la théorie

La courbe grise représente le « $\cos^2 \alpha$ » de l'angle α d'orientation du détecteur. Elle se superpose très bien sur la distribution de probabilité de mesurer « +1 » pour notre expérience, en accord avec les mesures obtenues par la mécanique quantique. Cette distribution en cosinus se comprend car un couple de direction avec un écartement proche des 90° aura très peu d'orientations possibles pour passer dans un seul secteur alors qu'avec un écartement très faible aura beaucoup d'orientations possibles pour passer dans un même secteur. Ainsi le filtrage n'est pas linéaire.

1^{ère} Expérience EPR (cf. fichier « 04-Intrication E(a,b).xlsx ») :

Continuons maintenant en vérifiant que notre modèle vérifie les statistiques attendues pour $E(a, b) = P_{++}(a, b) + P_{--}(a, b) - P_{+-}(a, b) - P_{-+}(a, b)$ dans une expérience de type EPR. Pour cela nous reprenons notre expérience sur 1 détecteur et nous envoyons le même objet source sur un 2nd détecteur orienté indépendamment du 1^{er}. L'intrication est ainsi modélisée par une source dupliquée à l'identique qui correspondrait aux états quantiques traditionnellement notés $|\uparrow\uparrow\rangle$ ou $|\rightarrow\rightarrow\rangle$. On effectue l'analyse des corrélations sur les résultats des 2 détecteurs en décomptant les

résultats {« +1 » ; « +1 »}, {« -1 » ; « -1 »}, {« +1 » ; « -1 »} et {« -1 » ; « +1 »} (colonne Z, AA, AB et AC). Leurs probabilités (colonne AJ, AK, AL et AM) sont obtenues en se basant sur les évènements détectés (colonne AI). Pour information, on compte aussi les évènements non-détectés (colonne AF et AG) :

Z	AA	AB	AC	A AI	AF	AG
SI(ET(I3=1;S3=1);1;"")	SI(ET(I3=-1;S3=-1);1;"")	SI(ET(I3=1;S3=-1);1;"")	SI(ET(I3=-1;S3=1);1;"")			SOMME(AF:AF)
Nb++	Nb--	Nb+-	Nb-+		Evt Non-Dect	Nb Evt Non-Dect
					1	2727
AI	AJ	AK	AL	AM	AN	
SOMME(Z:AC)	SOMME(Z:Z)/AI3	SOMME(AA:AA)/AI3	SOMME(AB:AB)/AI3	SOMME(AC:AC)/AI3	AJ3+AK3-AL3-AM3	
Nb Evt Détecté	Prob++	Prob--	Prob+-	Prob-+	E(a,b)	
2772	0.486652237	0.513347763	0	0	1	

Tab.6

Voici les résultats obtenus pour une valeur d'évasement maximale de 30° des objets sources. La courbe verte est la courbe théorique attendue par la mécanique quantique, $E(a,b) = \cos(2\theta)$, avec θ la différence d'orientation des 2 détecteurs (Fig.7) :

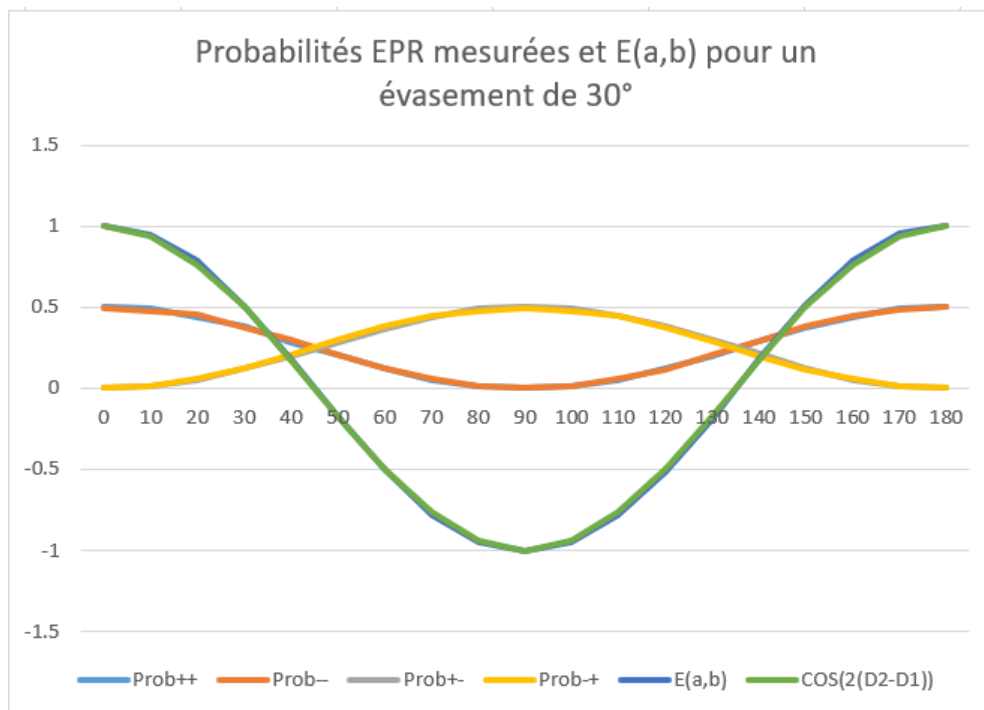


Fig.7 Probabilités EPR de notre simulation pour le cas d'un évasement maximale de 30° de nos objets sources (situation permettant d'obtenir des valeurs proches de la MQ)

On notera le très bon accord entre notre modèle et la théorie car on distingue difficilement les 2 courbes verte (théorique) et bleue (mesurée). C'est la raison de notre choix de couple de direction d'évasement maximale de 30° pour la Fig.7.

Notre modèle nous permet des écarts qui conduisent à une violation des inégalités de Bell par valeurs supérieures à celles prévues par la MQ, pour d'autres valeurs d'évasement des objets sources (Fig.8 et Fig.9) :

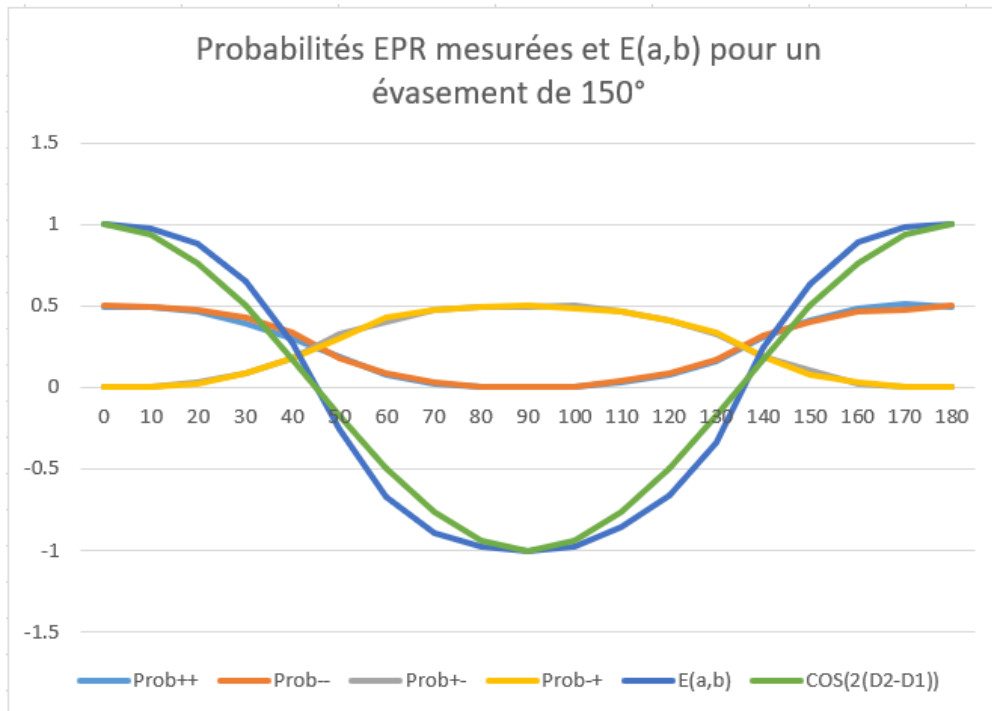


Fig.8 Probabilités EPR de notre simulation pour le cas d'un évasement maximale de 150° de nos objets sources (situation permettant d'obtenir des valeurs supérieures à la MQ)

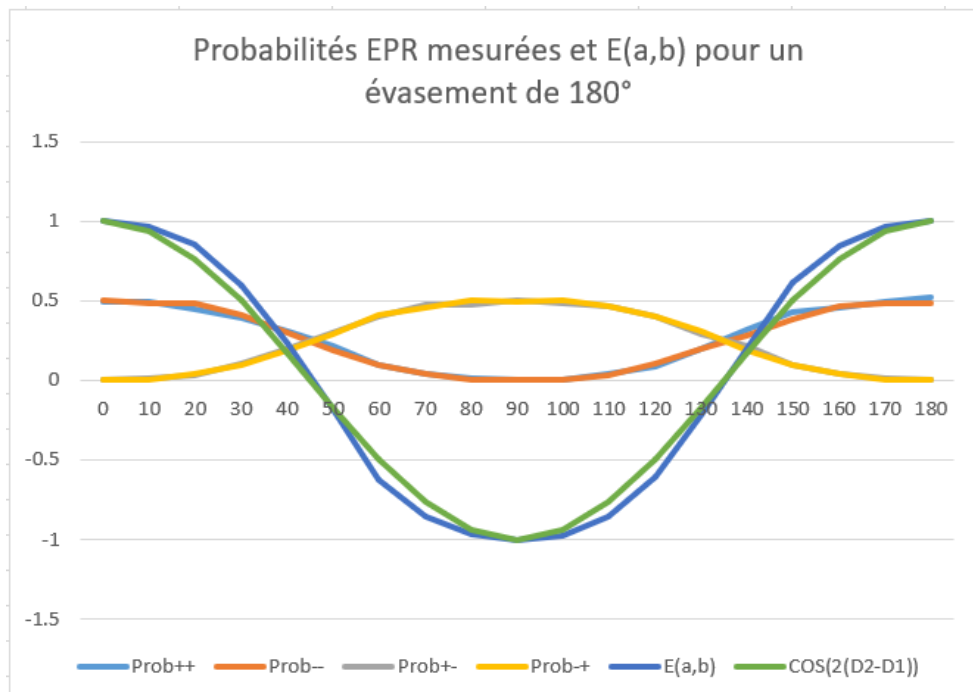


Fig.9 Probabilités EPR de notre simulation pour le cas d'un évasement maximale de 180° de nos objets sources (situation permettant d'obtenir des valeurs supérieures à la MQ)

Ou une violation des inégalités de Bell par valeurs inférieures à celles prévues par la MQ, pour d'autres valeurs d'évasement des objets sources (Fig.10) :

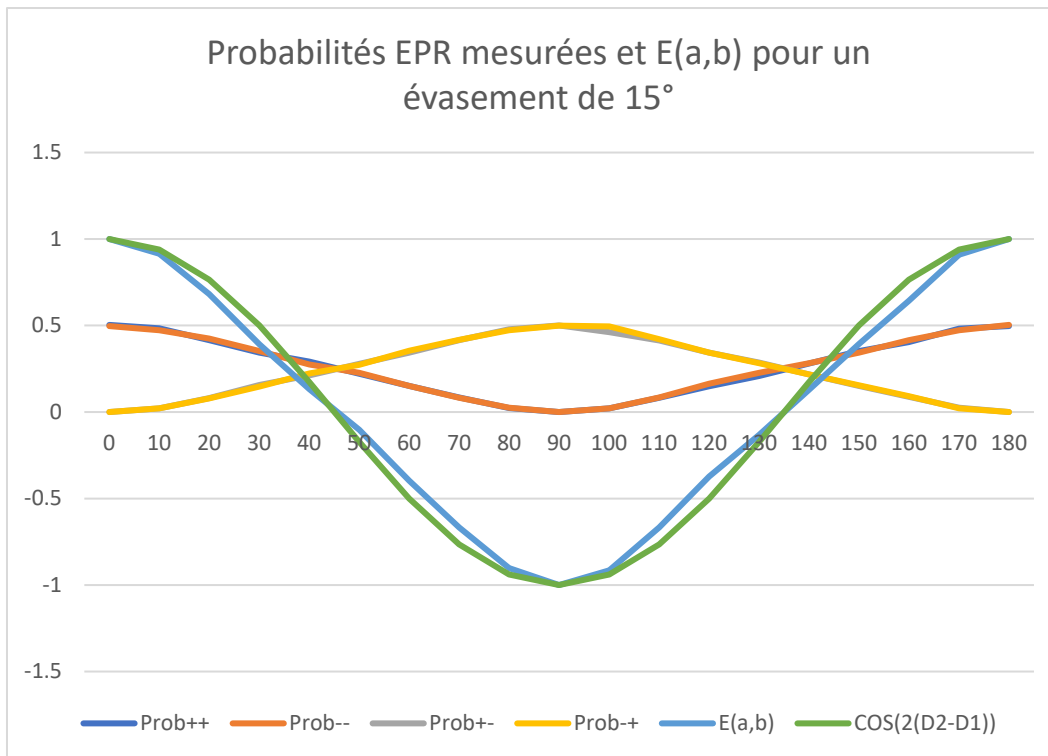


Fig.10 Probabilités EPR de notre simulation pour le cas d'un évasement maximale de 15° de nos objets sources (situation permettant d'obtenir des valeurs inférieures à la MQ)

Enfin, lorsque l'on réduit notre objet étendu (couple de directions non colinéaires) à un simple vecteur (couple de directions colinéaires) par un évasement maximal de 0° des objets sources, on retombe sur le cas classique qui ne viole pas les inégalités de Bell (Fig.11) :

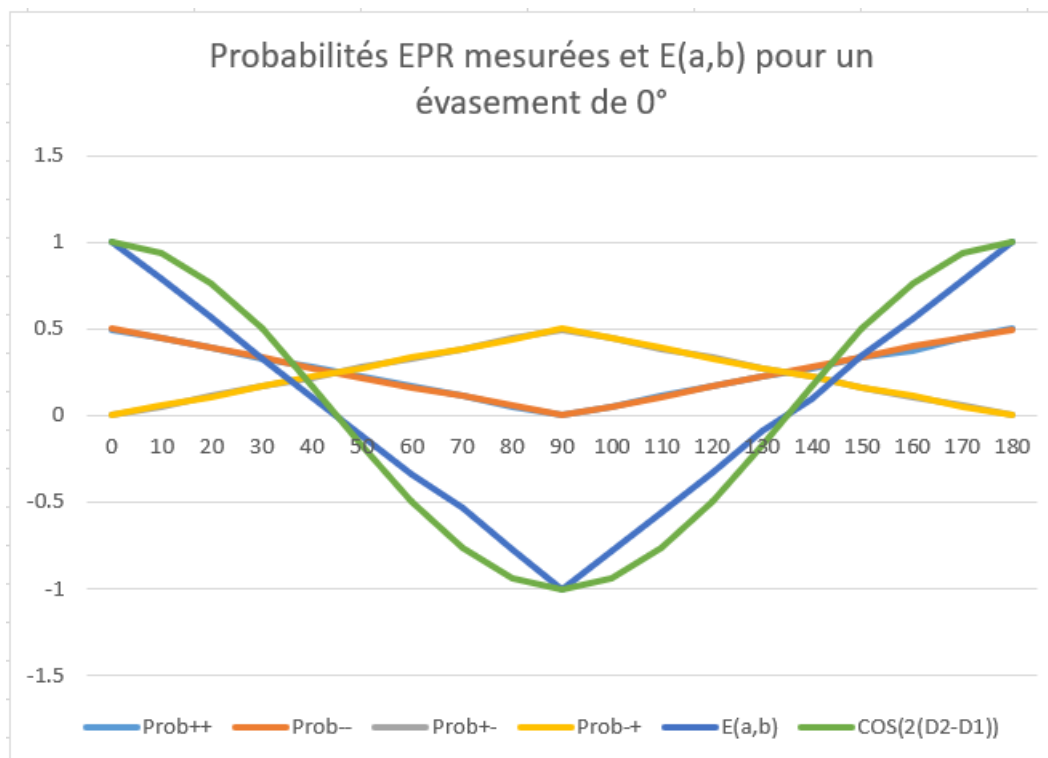


Fig.11 Probabilités EPR de notre simulation pour le cas limite de 2 directions colinéaires (évasement maximale de 0° de nos objets sources) correspondant à une situation ne violant pas les inégalités de Bell

Remarque : La simulation permet aisément de vérifier que notre modèle est bien isotrope. On obtient les mêmes résultats, pour une même différence d'angle des 2 détecteurs quelque soit leur orientation mutuelle (par exemple, les statistiques sont les mêmes pour {D1=0°, D2=20°} ou {D1=20°, D2=40°}).

2^{nde} Expérience EPR (cf. fichier « 05-Intrication Violation de Bell.xlsx ») :

Maintenant que tous les éléments sont en place, on peut vérifier les violations des inégalités de Bell de notre modèle qui ne sont que le post traitement des données précédentes. On rappelle que la valeur attendue par la MQ est $S_{MQ}(\theta) = E(a, b) + E(a, b') + E(a', b) - E(a', b') = 2\sqrt{2} \sim 2.83$ pour des valeurs de direction du détecteur 1, $a = 0^\circ$ ou $a' = 45^\circ$ et des valeurs de direction du détecteur 2, $b = 22.5^\circ$ ou $b' = 67.5^\circ$. Dans notre modèle, un évasement de 27.5° donne d'excellents résultats :

Evasement maximale source	27.5			
Paramètres	Détecteur 1	Coïncidences	Détecteur 2	Essais
a,b	4642	3839	4675	5500
a,b'	4644	3816	4634	5500
a',b	4646	3866	4689	5500
a',b'	4654	3853	4668	5500
Inégalité de Bell Mesurée	2.82621558			

Tab.7

Mais on peut violer les inégalités de manière plus forte encore :

Evasement maximale source	170			
Paramètres	Détecteur 1	Coïncidences	Détecteur 2	Essais
a,b	2553	1510	2621	5500
a,b'	2671	1565	2628	5500
a',b	2631	1528	2618	5500
a',b'	2620	1526	2637	5500
Inégalité de Bell Mesurée	3.43213582			

Tab.8

Ou de manière plus faible :

Evasement maximale source	5			
Paramètres	Détecteur 1	Coïncidences	Détecteur 2	Essais
a,b	5360	5225	5365	5500
a,b'	5360	5220	5360	5500
a',b	5357	5201	5344	5500
a',b'	5358	5174	5316	5500
Inégalité de Bell Mesurée	2.12704954			

Tab.9

Notre solution permet d'obtenir une plage de violation des inégalités de Bell (grossièrement dans l'intervalle $S_{MQ}(\theta) \in [2 ; 3.5[$ pour les directions précédentes a, a', b, b'). Sur la Fig.12, on présente

quelques valeurs mesurées en fonction de l'évasement des couples de direction des objets sources. Ces mesures ont été réalisées avec les mêmes valeurs de direction du détecteur 1, $a = 0^\circ$ ou $a' = 45^\circ$ et de direction du détecteur 2, $b = 22.5^\circ$ ou $b' = 67.5^\circ$. Il est donc possible que pour ces directions, la violation ne soit pas maximale pour les évasements différents de 27.5° qui correspond à la maximisation dans le cadre des distributions de la MQ.

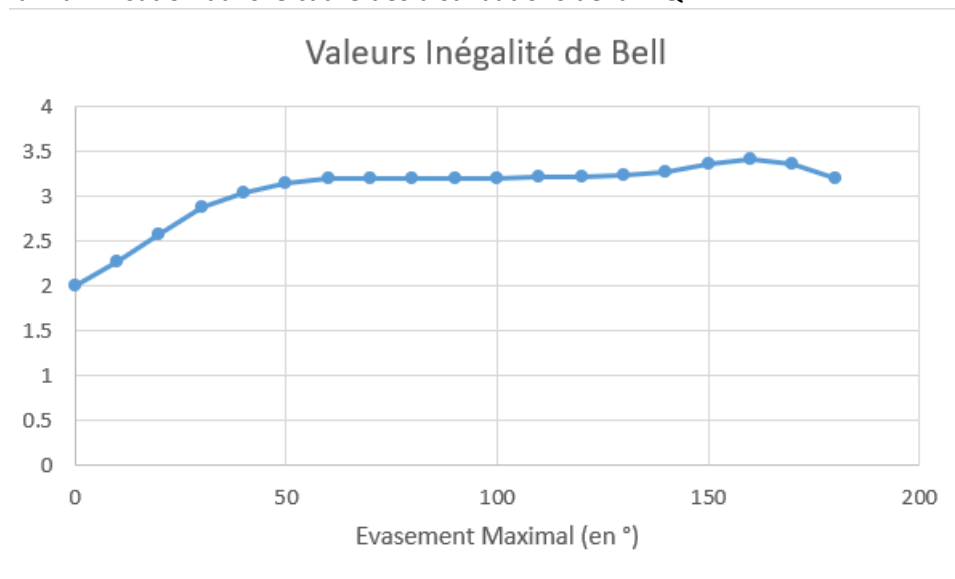


Fig.12 Quelques exemples de valeurs $S_{MQ}(\theta)$ de violation des inégalités de Bell (différente de celles de la MQ) obtenus par notre simulation pour des différents évasements.

A noter, qu'on obtient aussi les mêmes résultats que ceux prévus par la MQ dans l'autre cas de maximisation de la violation des inégalités de Bell ($S_{MQ}(\theta) = -2\sqrt{2} \sim -2.83$), à savoir pour les valeurs de direction du détecteur 1, $a = 0^\circ$ ou $a' = 135^\circ$ et de direction du détecteur 2, $b = 67.5^\circ$ ou $b' = 202.5^\circ$.

A propos des non-détections :

Distribution (des détections et non-détections) des objets sources dans un secteur du détecteur :

On peut noter auparavant que la source d'objets émet des objets sources de manière isotrope, puisque leur définition s'effectue de manière aléatoire et dans toutes les directions. On note aussi que tous les objets sources peuvent être détectés car en faisant tourner le détecteur selon toutes les directions possibles, ils peuvent tous passer par un secteur. Ceci signifie qu'aucune configuration d'objet source ne peut être déclarée comme non détectable avant détection.

Ensuite si l'on choisit des objets sources avec un même évasement et qu'on regarde les différentes possibilités de détection dans un secteur (Fig.13), on comprend que le nombre de possibilités d'objets sources détectés pour un même évasement sera plus faible lorsqu'on considère des évasements proches de la taille d'un secteur (en l'occurrence 90°) et plus grand pour de petits évasements.

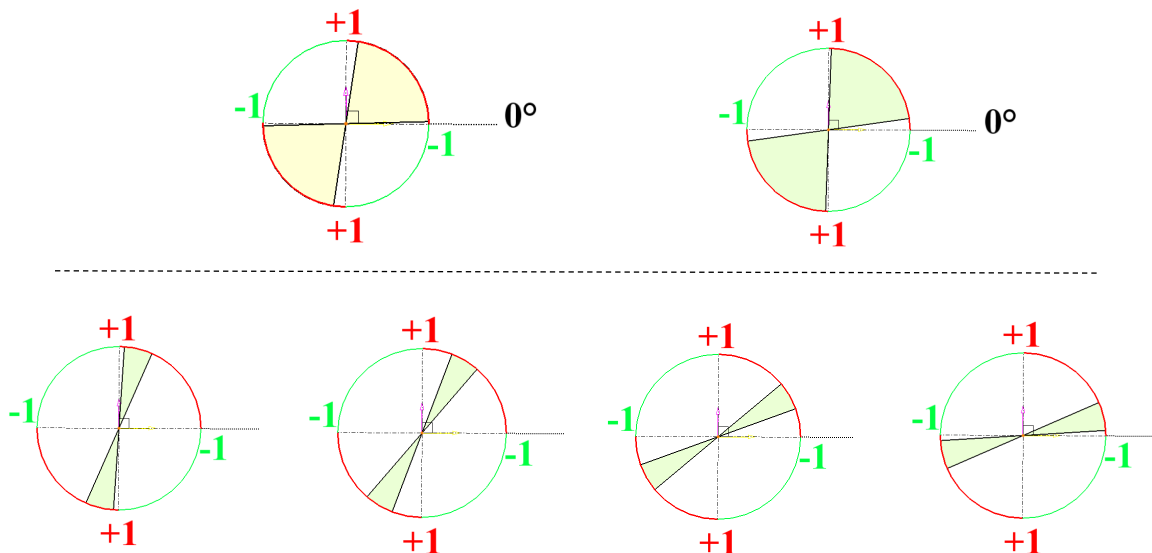


Fig.13 : Pour des évasements proches de la taille d'un secteur, il y a moins d'occurrences possibles de détection (en haut) que pour de petits évasements (en bas).

Notre simulation, nous permet d'étudier dans quelle mesure se produit ces non-détections en fonction de l'évasement choisi. En répétant, notre expérience sur un détecteur toujours orienté de la même manière mais avec des objets sources, émis non plus avec un évasement choisi au hasard dans un intervalle mais avec un évasement fixe, on obtient la courbe donnant le nombre de détection de « +1 », de « -1 » et de non-détections en fonction de l'écartement fixe des objets sources (Fig.14).

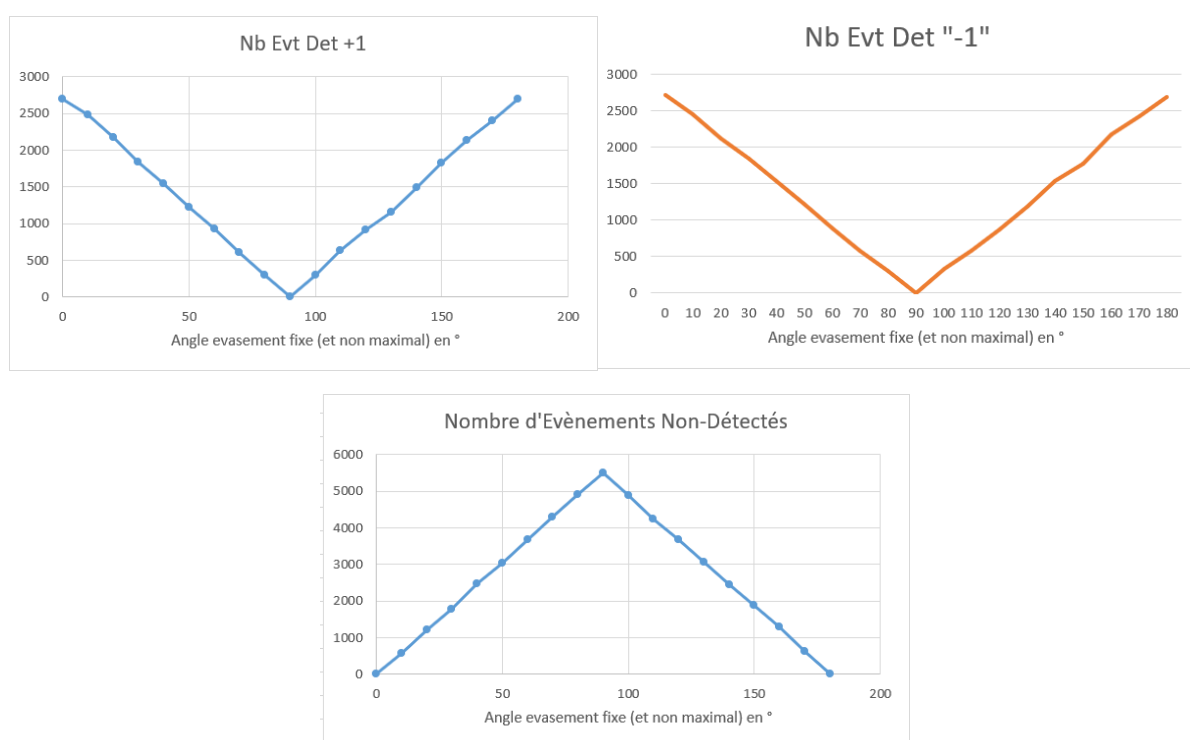


Fig. 14 Nombre mesuré de résultats « +1 », « -1 » et non-détections sur un détecteur orienté dans une seule direction en fonction de la valeur fixe de l'évasement des objets sources. 5500 essais ont été

effectué par expérience (cf. fichier « 06-UN Détecteur orienté selon UNE direction - Evasements fixes.xlsx »)

Ces courbes de la Fig.14 traduisent quantitativement les conséquences de la Fig.13. Toutes ces expériences pour des évasements fixes différents ont été réalisées avec un même nombre d'essais (5500). La courbe des non-détections peut s'obtenir comme la complémentaire à 5500 de la somme des détections « +1 » et « -1 ».

Un point important est à noter. L'expérience EPR numérique (effectuée dans cet article avec un évasement défini sur un intervalle) peut s'effectuer avec des objets sources d'évasement fixe et les inégalités de Bell seront encore violées. Dans ce cas, l'évasement fixe qui se rapproche le plus des résultats de la MQ (pour les mêmes directions des détecteurs) est un évasement fixe de 13° (Tab.10).

Evasement maximale source	13			
Paramètres	Detecteur 1	Coïncidences	Detecteur 2	Essais
a,b	4705	3932	4727	5500
a,b'	4726	3927	4701	5500
a',b	4711	3882	4671	5500
a',b'	4700	3909	4709	5500
Inégalité de Bell Mesurée	2.82509026			

Tab.10 : (cf. « 08-Intrication Violation de Bell - Evasement Fixe.xlsx »)

Pour cette même valeur d'évasement fixe de 13°, la courbe de $E(a, b)$ se rapproche beaucoup de celle de la MQ (Fig.15), mais elle s'en approche légèrement moins bien que celle vue en Fig.7 et elle est différente car elle ressemble plus à une succession de segments contrairement à celle obtenue en Fig.7.

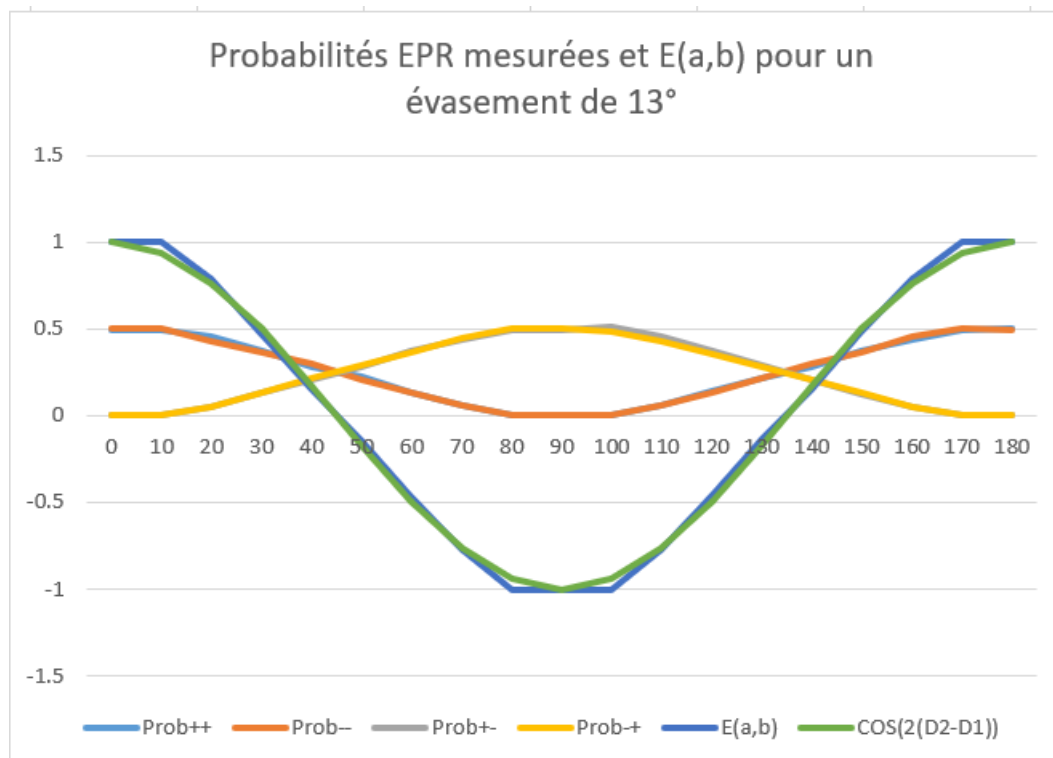


Fig.15 (cf. « 07-Intrication E(a,b) - Evasement Fixe.xlsx »)

Ainsi ce que semble nous indiquer notre simulation est que la meilleure approximation des résultats de la MQ s'obtient avec des évasements de nos objets sources qui ne soient pas fixe mais qui soient une valeur maximale, définissant ainsi un intervalle d'évasement possible. Ce qui signifierait alors que dans les expériences réelles, les sources de photons ou autres objets ne sont pas non plus définis avec des caractéristiques fixes mais sur des intervalles de valeurs possibles.

On peut encore faire une dernière constatation remarquable sur la distribution des non-détections, seul le cas des objets sources à 2 directions colinéaires (évasement maximale nul et donc un seul paramètre inconnu, l'orientation) permet d'avoir un ensemble de non-détection vide.

Comme annoncé précédemment, montrons que les non-détections des expériences précédentes :

- Sont impossibles à éviter
- Ne peuvent correspondre non plus à une 3^{ème} valeur (qui compléterait les sorties possibles « +1 » et « -1 »)
- Sont d'un autre type que les échappatoires des expériences EPR réelles

Impossibilité d'éviter les non-détections :

Dans le cadre de notre expérience, on remarque que si les 2 directions nécessaires à la mesure sont légèrement supérieures à 90°, ces objets sources se trouveront très probablement dans l'ensemble des non-détections car chacune des 2 directions se retrouvera très probablement dans 2 secteurs de valeurs différentes (Fig.13). Un moyen à priori de réduire alors cet ensemble serait de diviser notre détecteur en plus de 4 secteurs ce qui permettrait pour certains de ces angles de se retrouver à nouveau dans 2 secteurs symétriques. Mais à l'opposé certaines directions qui précédemment se trouvaient dans 2 secteurs symétriques vont se retrouver dans le groupe des non détections. Il y a en fait systématiquement un passage d'élément entre les groupes des non-détections et des détectés. Ceci découle du fait fondamental que nos mesures prennent en compte un couple de directions non colinéaires. Il s'agit donc d'un objet irréductible à une valeur (irréductible à 1 point !). On rappelle qu'on a vu précédemment que le cas limite d'évasement nul (donc de couples de directions colinéaires) donne le cas limite de non violation des inégalités de Bell, $S_{MQ}(\theta) = 2$. Et seul ce cas permet une détection de 100%.

Si, sur le détecteur, on multiplie les secteurs, et donc qu'on réduit leur taille, une détection permettra d'obtenir une meilleure précision d'orientation de l'objet mesuré, mais en conséquence de nombreux objets sources ne seront plus détectés. De l'information sur l'ensemble source sera perdue au détriment d'une information gagnée sur un individu. Et inversement, quelque soit le découpage en secteur, même pour les objets qui ont un évasement inférieur à l'angle du secteur, leurs directions aléatoires garantissent qu'il y aura toujours des objets dont une direction se trouvera d'un côté de la limite d'un secteur et l'autre direction de l'autre côté de la limite. Ceci est fondamentalement dû au fait d'avoir un objet « étendu » (irréductible) et rend l'ensemble des non-détections impossible à éviter.

L'ensemble des non-détections ne correspond pas à une 3^{ème} valeur de notre expérience :

Nous venons de voir qu'il est impossible d'éviter les non-détections. Regardons maintenant dans le cas d'un détecteur à 2 valeurs quelles informations nous fournissent les objets sources détectés et non-détections. Sur la Fig.16, on a reporté, les résultats d'un détecteur en fonction de l'orientation et de l'évasement de l'objet source.

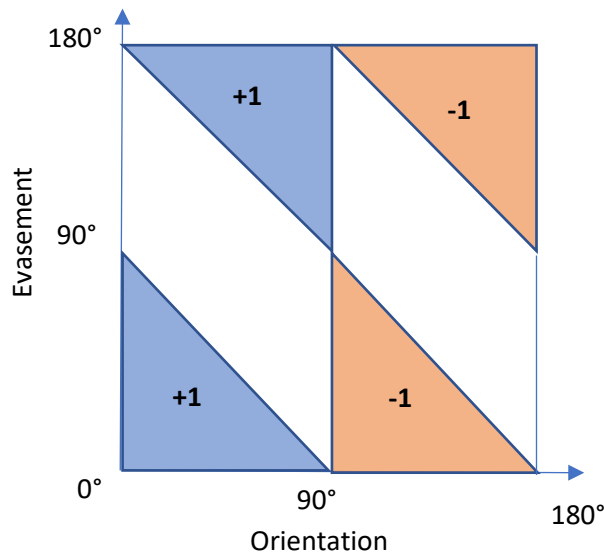


Fig.16

On remarque que si le résultat de la détection est « +1 » (zone bleue sur Fig.16), on ne peut rien dire sur la valeur d'évasement (tout l'intervalle $[0^\circ ; 180^\circ]$ est possible) mais sur l'orientation il permet de réduire de moitié l'intervalle (seul l'intervalle $[0^\circ ; 90^\circ]$ est possible). Idem avec le résultat « -1 » mais c'est alors l'autre moitié de l'intervalle d'orientation (seul l'intervalle $[90^\circ ; 180^\circ]$ est possible). On note que cela est cohérent avec le fait que cette expérience est une mesure des valeurs propres de l'observable orientation (spin). Par contre, et c'est là le point important, l'ensemble des non-détections s'étale sur tout l'intervalle d'évasement et d'orientation, une non-détection ne nous donne donc aucune information sur l'orientation et ne peut alors pas être considérée comme une 3^{ème} valeur.

Remarque : Précédemment, on a parlé de diviser en plus de 4 secteurs le détecteur pour affiner les résultats, mais cela rend encore plus dramatique la situation de l'ensemble des non-détectés car alors il existe un sous-ensemble de non-détectés qui est impossible à détecter quelque soit l'orientation du détecteur. On n'est alors dans une situation différente du découpage en 2 valeurs qui rendait par contre tous les objets sources détectables (comme on l'a déjà indiqué précédemment). En effet avec 6 secteurs de 60° , pour les évasements compris, par exemple dans $]60^\circ ; 120^\circ[$, les 2 directions ne se situent jamais dans un secteur de même valeur et seront ainsi systématiquement non-détectés quelque soit l'orientation du détecteur. L'ensemble des non-détectés est ainsi « pollué » par des objets sources inutile à l'expérience qui rendrait plus critique encore l'affectation d'une 3^{ème} valeur. On peut noter cependant qu'à priori on pourrait imaginer éviter ce sous-ensemble de non-détections en filtrant les objets sources avant le détecteur.

A ce stade, on peut envisager une 2^{nde} interprétation intéressante de nos objets sources qui conduit à un autre type de sous-ensemble de non-détection. Jusqu'à maintenant, nous avons considéré des objets sources « étendus » mais sans épaisseurs et des détecteurs avec des séparations sans épaisseurs entre secteurs. Autrement dit dans nos expériences, on peut considérer que les objets sources, qu'ils soient détectés ou non, ressortent des détecteurs sans modification (ce point donne d'ailleurs un éclairage nouveau sur l'interprétation de la MQ quant à l'influence de la mesure sur l'objet mesuré). Ceci nous a mené à considérer 2 types d'ensembles de non-détections l'un contenant des objets sources détectables (mais n'apportant aucune nouvelle information, Fig.16) et l'autre contenant des objets sources systématiquement indétectables quelque soit l'orientation (cas des détecteurs à plus de 4 secteurs). En donnant un aspect « solide » aux éléments de notre

expérience, on obtient un 3^{ème} type d'ensemble de non-détections formé d'objets sources détectables (comme le 1^{er} type d'ensemble) mais dont la non-détection entraîne la disparition en sortie de détecteur. Dans cette étude, nous ne favoriserons ni l'interprétation « solide », ni l'interprétation précédente « non solide ». Seules des expériences réelles pourront déterminer l'interprétation la plus pertinente. Nous allons simplement présenter rapidement cette 2^{nde} interprétation possible qui offre un 3^{ème} type de non-détections que l'on ne peut à nouveau pas considérer comme une 3^{ème} valeur en termes de résultats de détection.

En fait, on peut aisément imaginer de telles expériences correspondant à cette interprétation « solide » dans notre quotidien, au travers des jeux d'enfants pour lesquels il faut faire passer des pièces d'une certaine forme dans des contre formes. Imaginons avoir des cylindres tous de même longueur mais de largeurs différentes et une contre forme en forme de croix aux branches de longueur supérieure aux longueurs des cylindres (cette dimension ne sera donc pas filtrée) mais d'épaisseur égale à la moyenne des différentes épaisseurs des cylindres. Si l'on se donne la règle de maintenir l'orientation des cylindres (de ne pas les faire tourner), nous serons proche des conditions de nos expériences. Certains cylindres passeront par la branche horizontale de la croix, d'autres par la branche verticale et certains ne passeront pas. Le passage dans la branche horizontale est une mesure donnant un intervalle d'épaisseur et d'orientation (les cylindres les plus fins pouvant avoir une certaine marge d'orientation pour passer dans l'épaisseur de la branche). Même chose pour la branche verticale mais avec un autre intervalle d'orientation (mais à priori le même intervalle d'épaisseur). Par contre, les non-détections vont correspondre soit à des cylindres qui sont trop épais (objets systématiquement non-détectables) soit à des cylindres dans l'intervalle d'épaisseur possible mais en-dehors de l'intervalle d'orientation (objets détectables mais non détectés). Mais dans ce dernier cas l'objet source ne sortira pas du détecteur et ne pourra plus être étudié dans un 2nd détecteur. Cette interprétation a donc des conséquences mesurables par rapport à l'interprétation « non solide » avec des non-détections qui se perdent à chaque passage de détecteur.

Les non-détections de la simulation ne sont pas les échappatoires des expériences EPR réelles :

Dans notre simulation, nous contrôlons complètement les objets sources non détectés et nous savons pourquoi ils n'ont pas donné de mesure. Alors que dans les expériences EPR, nous contrôlons beaucoup moins bien ce qui est émis. L'absence de détection peut être due en partie pour les raisons précédentes mais aussi évidemment par des pertes en ligne (que nous n'avons pas dans notre simulation qui a un taux d'efficacité de 100% puisque tous les objets sources passent dans les détecteurs et tous sont testés). Ces pertes en ligne vont évidemment potentiellement correspondre à la perte d'objets sources qui auraient pu être effectivement mesurés (n'appartenant pas à l'ensemble des non-détections). Ce sont ces détections perdues qui pourraient amener à modifier les statistiques, ce que l'on nomme les échappatoires [3]. Les non-détections dont il s'agit dans notre simulation sont d'une autre nature car numériquement il n'y a aucune perte en ligne. Dans notre simulation, il n'y a pas d'échappatoire. Mais inversement, cette étude nous indique que, si notre solution est représentative des expériences de mécanique quantique, les non-détections des expériences réelles d'EPR ne sont pas exclusivement des pertes en ligne mais aussi des non-détections irréductibles. Ceci expliquerait en partie la difficulté à obtenir des efficacités élevées (en raison de l'existence d'un seuil supérieur d'efficacité possible). Cela implique une conséquence expérimentale sur les mesures d'efficacité. Le taux d'efficacité devrait ne mesurer que les pertes en ligne mais pas le taux des non-détections (dans notre simulation, il n'y a pas de pertes en ligne, on a donc une efficacité de 100%). Expérimentalement, pour pouvoir distinguer le taux d'efficacité du taux de non-détections, on pourrait les calculer en faisant d'abord passer les objets sources dans un 1^{er} détecteur puis ne renvoyer que les objets ayant donné un certain résultat (par exemple « +1 »)

sur un 2nd détecteur pour avoir un ensemble source connu. Avec une même direction de ce 2nd détecteur que le 1^{er}, le rapport du nombre de détection D2/D1 serait l'efficacité de D2 (dans notre simulation, ce rapport est effectivement de 100%). Elle ne devrait pas dépendre de l'orientation. Et pour une orientation de D2 différente de D1, le rapport D2/D1 mesurerait à la fois le taux d'efficacité (déduit de l'expérience précédente à même orientation) et le taux de non-détections (objets sources testés par le détecteur mais ne donnant pas de mesure), d'où l'on pourrait déduire le taux de non-détections. Ce taux de non-détections devrait dépendre de la différence d'orientation entre les 2 détecteurs (et devrait être nul sans différence d'orientation). Il faut alors bien faire attention au vocabulaire utilisé, les échappatoires expérimentales correspondraient uniquement au taux d'efficacité, puisque le taux de non-détections, dans ce cadre théorique, serait inhérent à la théorie (aucune efficacité est en jeu dans cet ensemble) et irréductible.

Interprétation du couple de direction par une forme de sablier :

Nous avons précédemment pris l'exemple des jeux de forme pour enfant. Notre modélisation correspond potentiellement à un tel jeu. En effet, le couple de direction qui définit notre objet source n'est rien d'autre qu'une forme de sablier idéal (réduit à un point dans sa partie la plus resserrée). Les détecteurs peuvent alors être vu comme une grille idéale pour laquelle la croix perpendiculaire est formée de branche sans épaisseur. Pour des sabliers d'évasement inférieur à 90°, si le sablier source rencontre une branche de la grille (i.e. le couple de directions se trouve sur 2 secteurs de valeurs différentes) le sablier ne passe pas le détecteur, dans les autres cas il est détecté donnant « +1 » ou « -1 ». Dans cette interprétation « sous forme de solide », des sabliers avec un évasement compris entre 90° et 180° ne peuvent éviter de rencontrer la grille. Du coup, même si leurs bords (les 2 directions du couple objet source) se trouvent dans un secteur symétrique de même valeur, ils ne passeront pas le détecteur. Pour satisfaire cette interprétation et filtrer l'ensemble des non-détections des objets sources systématiquement indétectables, il suffit de considérer, dans notre modélisation, seulement les valeurs d'évasement comprises entre 0° et 90°. A noter que la limitation à l'intervalle [0°,90°] de notre modèle est suffisant pour confronter cette interprétation à la MQ. En effet, on obtient la valeur de violation des inégalités de Bell calculée par la MQ dans cet intervalle. L'interprétation physique de sabliers sources pourrait donc aussi être pertinente pour interpréter la MQ dans le cadre des expériences EPR. Par contre, comment mentionné précédemment, cette interprétation se différencie expérimentalement dès que l'on fait se succéder plusieurs détecteurs.

Ainsi notre objet étendu (objet source) peut se voir :

- Soit comme un couple de 2 directions (vide entre ces 2 directions),
- Soit comme un sablier (plein entre ces 2 bords)

Discussion :

Cette étude montre qu'une interprétation réaliste permet de retrouver les résultats d'expérience EPR. Néanmoins, cette interprétation va effectivement au-delà d'une modélisation « classique » à plusieurs titres. Bien que rien ne dise que notre solution puisse fonctionner sur d'autres expériences de MQ, elle pourrait ouvrir la voie à une nouvelle classe de modélisation pour la MQ. Les ingrédients pour une interprétation de la MQ pourraient bien se trouver dans ce genre de modélisation. Il est donc important de reprendre les éléments clés de notre simulation.

Il s'agit de la modélisation par des objets étendus (couple de paramètres) et son corollaire l'impossibilité de mesurer tous les objets sources dans une même expérience (ensemble irréductible d'objets non-détectés). Une autre conséquence apparaît, mais spécifiquement pour ces expériences

EPR, la violation systématique des inégalités de Bell. Ces éléments fondamentaux font étonnamment échos à plusieurs caractéristiques de la MQ :

Thème de la non-localité (objet étendu) :

Un des intérêts majeurs des expériences EPR est de mettre à mal la notion de localité de la réalité physique. Dans une interprétation « classique » (plus exactement que je qualifierai de « linéaire », j'en parle un peu plus loin), cela s'interprète comme une transmission d'information instantanée ou du moins supérieure à la vitesse de la lumière. Dans notre simulation, il n'y a aucune information qui circule entre les détecteurs. La simulation numérique que nous venons de réaliser permet du coup de redonner une interprétation nouvelle à la non-localité. Il s'agit d'une « non-localité locale » due à la modélisation d'objets étendus (irréductible à un point). Car comme on a pu le constater, dans le cas limite d'un évasement nul (réduction à une direction), la valeur de l'inégalité de Bell tend vers 2. Mais dès que l'évasement des sabliers est non nul, la violation des inégalités est systématique. Dans cet ordre d'idée, on peut se demander si la MQ n'est pas une approche linéaire d'une réalité qui nécessiterait une théorie non-linéaire.

Thème de la mesure en MQ (objet étendu) :

Il y a une autre conséquence de la modélisation par des objets étendus qui pourrait expliquer l'impression quantique de modification de l'objet mesuré après une mesure. Comme l'objet a une orientation étalée dans un intervalle, lorsqu'il passe par un détecteur, on peut seulement en conclure qu'il appartient à une certaine distribution de « sabliers » qui sont susceptibles d'être passés. En conséquence, on sait que si le sablier (qui n'a pas été modifié) repasse par un autre détecteur de même orientation, il sera détecté cette fois-ci de manière certaine (donnant l'impression d'avoir modifié l'objet mesuré), mais dès que l'on changera l'orientation du détecteur (aussi petit que soit ce changement) on ne peut plus garantir que le « sablier » pourra passer dans le même secteur (en rendant le résultat de nouveau probabiliste). Car il s'agit peut-être d'un sablier très évasé qui était en limite d'être non-détecté ou bien très fin et en limite de changer de secteur et donner une autre valeur. Mais dans notre simulation, à aucun moment l'objet mesuré est modifié.

L'objet étendu fait perdre la bijection classique entre mesure d'une caractéristique et caractérisation univoque de l'objet mesuré. Dans ce contexte, à tout objet on peut assigner un résultat de mesure précis, par contre inversement, la mesure d'une caractéristique, ne pourra que réduire les objets possibles (vis à vis de cette caractéristique). La mesure ne caractérise/définit plus univoquement l'objet.

Comme on l'a vu dans cet article, l'objet étendu (le sablier) se définit par 2 paramètres. Les mesures sur cet objet étendu permettent seulement de limiter l'intervalle possible d'une des 2 caractéristiques définissant l'objet étendu (en l'occurrence l'orientation). On pourra réduire énormément l'intervalle, mais il ne sera jamais réduit à un point. Ce processus ressemble un peu au principe d'Heisenberg. Ce n'est peut-être pas tout à fait la même chose mais cette irréductibilité est certainement un ingrédient nécessaire qui conduit à ce principe.

On peut d'ailleurs rappeler que le terme « quantique » exprime le fait que des modifications infinitésimales se font par saut (et non de manière continue). Du coup, que les échanges s'effectuent par des objets qui ne peuvent être réduits à un point, autrement dit des objets étendus, irréductible n'est pas dénué de sens pour interpréter la MQ.

Thème de la complémentarité et de la dualité (ensemble de non-détections) :

Un point important est que la simulation numérique permet d'étudier l'ensemble des non-détections (impossible en conditions réelles). On peut le faire de 2 manières différentes. La 1^{ère} consiste à tourner les détecteurs d'un autre angle que celui de l'expérience en cours, mais, comme on l'a déjà vu, cela ne fait que passer une partie des non-détections dans l'ensemble des détectés et inversement (transfert partiel des ensembles des détectés et des non-détections). Cela révèle finalement une invariance des résultats par rotation. La seconde consiste à refaire la même expérience mais en remplaçant le détecteur par un détecteur « dual », toujours défini par 4 secteurs, mais dont les valeurs « +1 » et « -1 » sont portées par les 2 axes de séparation des secteurs et la règle de détection par la règle complémentaire :

Si les 2 bords du sablier se situent dans deux secteurs de valeurs différentes, le détecteur fournit en sortie la valeur de l'axe de séparation des secteurs qui intersecte le sablier.

Cette expérience duale/complémentaire (de l'expérience précédente) ne détectera que l'ensemble précédemment qualifié de non-détections, mais cette fois dans sa totalité, et l'autre ensemble deviendra l'ensemble des non-détections, aussi dans sa totalité (transfert total des ensembles des détectés et des non-détections). Et nous obtiendrons les mêmes statistiques. Cette caractéristique rappelle la transformation d'une matrice en une matrice adjointe. Ainsi ces ensembles de non-détections pourraient justifier l'usage de probabilité dans un espace de nombre complexe, espace privilégiée de la MQ avec sa notion de dualité.

En somme, on a 2 formes de complémentarité à 2 échelles différentes. Au sein de l'ensemble des détectés, les probabilités des 2 états notés $|\uparrow\uparrow\rangle$ ou $|\rightarrow\rightarrow\rangle$ se complètent (« $\cos^2 + \sin^2 = 1$ »). Mais aussi, les 2 ensembles de détectés et de non-détections se complètent pour former des expériences duales/complémentaires.

L'existence de cet ensemble de non-détections pourrait être un signe caractéristique des expériences de MQ, lorsque les réponses possibles à une mesure ne sont plus simplement binaires mais "ternaires" avec comme 3^{ème} réponse possible l'indétermination/la non mesurabilité. Les guillemets signifient que c'est un 3^{ème} élément de nature différente des 2 autres valeurs. Cela rappelle ce qui se passe en logique mathématique pour les valeurs de vérité d'une formule qui peut être vraie ou fausse. Il existe une 3^{ème} voie, une « échappatoire » Gödelienne, par laquelle une formule peut être indécidable. Et cette 3^{ème} voie n'est pas une échappatoire ou un biais de raisonnement, mais un fondement de la logique.

Objet étendu et non-linéarité :

Une théorie qui se base sur des objets non réductibles à un point est très certainement une théorie non linéaire [4] (pas seulement non linéaire dans ses équations d'évolution mais surtout dans sa modélisation mathématique des éléments de base, c'est-à-dire en allant au-delà de la notion même de vecteurs). L'adéquation de notre solution avec les résultats d'expérience EPR, nous laisse penser que la MQ serait en quelque sorte une approximation linéaire d'une théorie non linéaire plus profonde, sous-jacente. Ce point de vue serait cohérent avec certaines caractéristiques de la MQ partagées avec le non-linéaire. Par exemple, l'intrication avec ses effets corrélés quelque soit la taille du système est une forme d'invariance d'échelle, caractéristique que l'on retrouve dans le domaine du non-linéaire. La difficulté à atteindre des taux d'efficacité élevée dans les expériences de MQ est peut-être révélateur d'une non-binarité de la réalité quantique, là encore un élément central du domaine non-linéaire.

Ces changements d'échelle qui caractérisent le non-linéaire pourrait donner une voie d'interprétation pour certaine expérience de MQ, comme celle de l'expérience des fentes d'Young. On peut en effet imaginer que la diffraction puisse apparaître comme un moyen de grossissement de ces objets étendus. Ces objets sources agrandis pourraient alors atteindre des tailles suffisantes pour passer effectivement dans les 2 fentes de l'expérience d'Young (seul moyen réaliste à priori d'expliquer les figures de diffraction par passage photon par photon). Il est à noter que cette possibilité de grossissement serait une caractéristique fondamentale et spécifique aux objets étendus (au domaine du non-linéaire) car la modélisation ponctuelle (linéaire) ne le peut pas (un point restant toujours un point après grossissement).

Fonction d'onde et vecteur d'état (objet étendu) :

Quant à l'interprétation de la fonction d'onde, notre étude apporte aussi un éclairage intéressant. La fonction d'onde pourrait concrètement décrire la distribution effective des objets étendus en fonction justement de leurs paramètres « extensibles » (de valeurs définies dans un intervalle). Elle serait par conséquent à la fois une distribution représentant de multiples objets étendus (un faisceau de photons par exemple), mais aussi de manière dual/complémentaire une distribution représentant les formes possibles d'un seul objet étendu (un photon unique par exemple dont les caractéristiques ne peuvent être définies à l'avance mais seulement limité à un intervalle et selon une certaine distribution). Une statistique qu'on peut interpréter indifféremment comme une population d'individus différents ou d'un individu aux caractéristiques différentes à l'image de cette population. On a là encore une sorte d'interprétation complémentaire entre une multiplicité d'individus et une individualité multiple.

Plus concrètement, cela signifie qu'un vecteur d'état (par exemple $|\uparrow\rangle$) représente un ensemble d'objets sources possibles fournissant un même résultat. Un peu à l'image de la notion de classe en mathématique, pour laquelle il existe de multiples représentants indistinguables. $|\uparrow\rangle$ est un représentant d'un ensemble, mais en même temps il représente l'ensemble car on ne sait jamais quel représentant il est. Il peut être vu comme un faisceau ou comme un objet individuel composant ce faisceau. Et si l'on cherche à affiner la détection pour déterminer l'état exact individuel (à la manière classique) alors la probabilité de détecter un objet source bien déterminé devient nulle (il devient un ensemble de mesure nulle au sens mathématique des distributions, réduit à un ensemble de points).

On peut chercher à aller encore plus loin dans la compréhension de ces objets étendu pour chercher la source de cette définition sur un intervalle. Ainsi, on pourrait imaginer qu'elle pourrait être due à une variation temporelle, une agitation, mais cette image reste malgré tout classique, car à chaque passage dans le détecteur, nous n'aurions qu'un vecteur comme dans une expérience classique. Une image plus juste serait d'imaginer nos objets comme un agglomérat de sous-objets identique à plusieurs échelles (une invariance d'échelle sur plusieurs niveaux). Comme un faisceau que l'on peut « découper » et qui forme à nouveau un faisceau (mais moins intense), jusqu'à atteindre un agglomérat unitaire (en-deçà duquel la composition ne se maintient plus, à l'image des quarks qui ne peuvent exister qu'en groupe). Chaque objet porterait une direction un peu différente les unes les autres. L'objet le plus élémentaire accessible serait ainsi un agglomérat minimal qui perdrait sa cohérence si ses composants deviennent trop peu nombreux. Et cette multiplicité définirait systématiquement un intervalle. Cette image ressemble beaucoup à ce que l'on attendait de la fonction d'onde décrite précédemment.

Intrication (objet étendu) :

L'intrication peut aussi mieux se comprendre avec ces images. L'intrication permet de fournir 2 objets corrélés de manière particulière. D'une part, ils partagent des intervalles connus (de ce point de vue on retrouve une corrélation classique), mais d'autre part au sein de cet intervalle chaque couple corrélé possède une liberté de position qu'on ne maîtrise pas et c'est cela qui transforme la corrélation en une intrication. Même si l'on maîtrise la position relative de chaque individu du couple (dans notre étude on a choisi la même position, $|\uparrow\uparrow\rangle$ ou $|\rightarrow\rightarrow\rangle$) on ne peut connaître la position de chaque individu par rapport à son propre détecteur et du coup dès que l'orientation des 2 détecteurs est différentes on a des résultats différents qu'on ne peut prédire précisément (contrairement au cas classique). Si la source possédait une direction précise, nous saurions pour quelle orientation le détecteur donnerait une autre valeur. Dans le cas d'un intervalle, le changement d'orientation du détecteur ne garantit pas le changement du résultat. Comme ces sources ne sont pas totalement décorrélées, c'est comme si on avait simultanément 2 expériences séparées (à 1 seul détecteur) mais dont on connaît les positions relatives des 2 objets sources (c'est-à-dire exclusivement ou bien $|\uparrow\uparrow\rangle$ ou bien $|\rightarrow\rightarrow\rangle$), sans connaître les positions absolues de chaque objet source (qui peuvent être $|\uparrow\rangle$ ou bien $|\rightarrow\rangle$). C'est d'ailleurs concrètement ce que réalise les expériences EPR en dupliquant l'objet source et les dirigeant chacun vers une expérience à 1 seul détecteur. L'intrication vient du fait qu'on connaît précisément l'information du système composé des 2 individus, mais qu'on ne connaît pas l'information portée par chaque individu indépendamment de l'autre.

Vers d'autres modélisations similaires :

Précédemment, on a abordé la possibilité d'augmenter le nombre de secteur dans le détecteur mais sans modifier l'objet source. En modifiant en parallèle le détecteur et l'objet source pour maintenir une certaine topologie, on est amené à définir toute une classe de modélisations similaires qu'il serait très certainement intéressant d'étudier. Par exemple, plutôt que de diviser le détecteur en 4 secteurs sur les 360° du disque, on pourrait le diviser en seulement 2 secteurs de 180° chacun. L'un donnerait le résultat « +1 » et l'autre « -1 ». Pour maintenir une même « topologie », les objets sources ne devraient plus être des sabliers mais simplement des demi-sabliers en ne gardant que partie triangulaire supérieure ou inférieure (cf. Fig.17). De même, on pourrait augmenter le nombre de secteur en passant à 6 secteurs par disque avec des objets source en forme de trisecteur. On a ainsi une progression de modèles possibles : détecteur à $2 \cdot 2^N$ secteurs de $180^\circ/2^N$ et objets sources en forme de 2^N triangle(s) (forme de part de gâteau) disposés régulièrement en rond tous les $360^\circ/2^N$ avec N un nombre entier quelconque. Le cas $N = 1$ correspond au cas traité dans cet article.

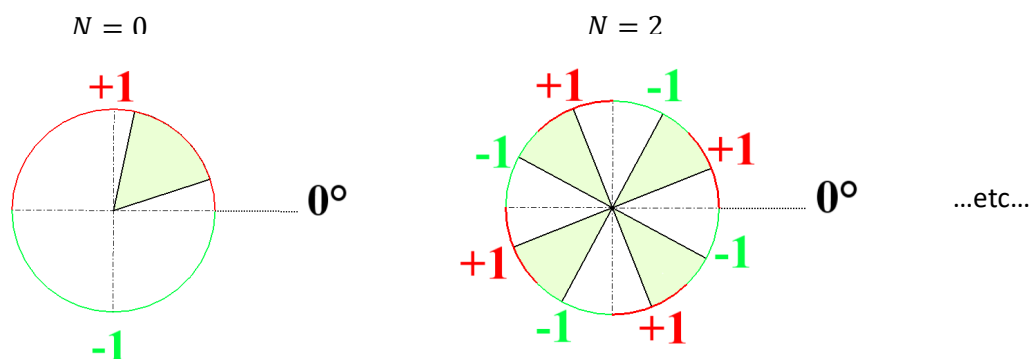


Fig.17

Et ces variantes à grand nombre de secteurs pourraient permettre des modélisations à plus de 2 valeurs (pas seulement « ± 1 ») en sortie de détecteur.

Conclusion :

Dans cette étude nous sommes arrivés à modéliser numériquement les expériences EPR et leur violation des inégalités de Bell sans aucune communication entre les différents éléments (sources ou détecteurs). Elle se réalise donc de manière plus réaliste, i.e. sans contredire les principes physiques déjà bien établis (par exemple aucune transmission supra-lumineuse n'est requise). Mais elle sort du cadre classique, car elle se fonde sur la notion d'objet étendu qui est une mise en forme réaliste de la non-localité de la MQ (forme locale d'une non-localité de la physique et par là même de la réalité aux très petites échelles). La contrepartie est de rendre inévitable les non-détections (qui sont d'une nature différente des échappatoires expérimentaux). Elle implique ainsi qu'expérimentalement les non-détections seraient composées à la fois de pertes de signal (qu'il faut réduire au maximum) mais aussi d'un ensemble irréductible. Cela expliquerait la difficulté que l'on a à augmenter le seuil d'efficacité des expériences EPR.

Cette modélisation n'est certainement qu'une représentation d'une classe très large de nouvelles modélisations susceptibles d'expliquer différentes expériences de MQ. Les principes de base qui ressortent de cette classe de modèle se résument essentiellement dans le triptyque « objet étendu (irréductible à un point) / ensemble irréductible de non-détection / violation des inégalités de Bell ». Ces éléments seront très certainement rattachés au domaine du non-linéaire.

On peut s'interroger si l'existence d'un ensemble irréductible de non détections dans les mesures ne justifie pas une approche nécessairement probabiliste de la théorie. La complémentarité et la dualité des ensembles de non-détections et de détections pourraient apporter un nouvel éclairage sur le rôle des nombres complexes dans la fonction d'onde. La modélisation par objets étendus pourrait expliquer les incertitudes sur les mesures de données conjuguées (par exemple l'impossibilité de définir une trajectoire aussi précisément que voulu), et peut-être aussi permettre la superposition des états.

A l'issue de cette étude, on peut même imaginer aller au-delà de la MQ actuelle. Notre étude suggère qu'on peut obtenir de nombreuses autres valeurs des inégalités de Bell. Comme on peut s'y attendre et comme cela est démontré dans les courbes Fig.8,9,10,12 cela se traduit par une courbe de $E(a, b)$ différente de celle de la MQ. On peut certainement imaginer une théorie (ou plus simplement une modélisation) avec d'autres formes de distribution de probabilité (autre que \cos/\sin).

D'autres modélisations sont aussi envisageables « topologiquement similaires » à celle étudiée dans cet article (en modifiant le découpage en secteurs des détecteurs et simultanément en adaptant les objets sources). Mais on peut aussi imaginer des expériences numériques qui, à l'heure actuelle, semblent difficilement réalisables. En effet, à partir de cette simulation, on peut facilement obtenir les résultats d'expériences EPR avec des détecteurs de plus de 2 valeurs ou même des expériences EPR toujours à 2 valeurs mais avec des intrications à 3, 4, ... photons, i.e. avec 3, 4, ... détecteurs pour obtenir non plus des couples $(\pm 1, \pm 1)$ mais des triplets $(\pm 1, \pm 1, \pm 1)$, des quadruplets, ... (des états intriqués du type $|\uparrow\uparrow\uparrow\rangle$ ou $|\rightarrow\rightarrow\rightarrow\rangle$...).

Cette étude, à travers ces objets étendus, espère avoir ouvert de nouvelles voies pour interpréter la mécanique quantique de manière plus conventionnelle. Mais de nombreuses questions quant à l'interprétation d'autres phénomènes quantiques restent à explorer sous cet angle (téléportation, cryptage, informatique quantique...). Comme pour la non localité, cela ne devrait pas remettre en cause les effets mesurés, mais leurs explications pourraient devenir moins "mystérieuses", moins contre intuitives et plus réalistes. On peut même espérer que la compréhension concrète (et non plus seulement calculatoire des phénomènes quantiques) puisse aider à proposer de nouvelles idées

de réalisation de ces phénomènes. Il serait même utile de reprendre des expériences basiques pour mieux appréhender ces objets étendus sources, comme par exemple l'expérience des fentes d'Young qui met en lumière la dualité onde corpuscule de la MQ (l'objet étendu pourrait être vu comme un tout "moyenné", le corpuscule, mais aussi comme un lieu dans lequel se propage une onde, due à son extension).

Cette modélisation n'est pas une théorie à variables cachées, par contre la variable décrivant le système est indéterminable précisément (non ponctuelle), on ne peut qu'accéder à un intervalle de valeurs possibles. Le problème des théories à variables cachées vient de ce que l'on cherche à obtenir une valeur bien déterminée sur un objet qui se définit intrinsèquement par un intervalle de valeur. C'est comme si l'on souhaitait obtenir la superficie et la position d'un pays. La superficie est une caractéristique qui a priori peut se réduire à une valeur, mais la position d'un pays, sauf s'il est réduit à un point, ne peut être défini que sur un intervalle.

Un résultat réduit à une valeur sur un système étendu permet de le connaître partiellement, approximativement, mais ne suffit pas à le connaître totalement. La force de la procédure mathématique de la MQ serait, dans cette interprétation, de permettre de suivre, de faire évoluer et d'effectuer des opérations sur ces intervalles de valeurs vu comme des objets étendus au travers de fonctions de probabilités.

On peut se demander si cette interprétation ne donne pas un éclairage nouveau sur la polémique EPR, car finalement, elle révélerait que le nœud du problème était la manière « linéaire » de penser la réalité : peut-on définir tout objet par une liste dénombrable infinie de caractéristiques (vision linéaire) ou bien le passage au continu discrédite-t-il irrémédiablement ce réductionnisme au dénombrable ? Comme nous l'enseigne les mathématiques la « cardinalité du dénombrable » n'est pas la « cardinalité du continu » et encore moins sa limite.

REFERENCES

[1] Kracklauer A. F., "Nonlocality, Bell's Ansatz, and Probability", *Optics and Spectroscopy*, 2007, Vol. 103, No. 3, pp. 451–460, DOI: 10.1134/S0030400X07090147

[2] A. Aspect, "Closing the Door on Einstein and Bohr's Quantum Debate", *Physics* 8, 123 (2015), DOI: 10.1103/Physics.8.123

[3] N. Gisin, B. Gisin, "A local hidden variable model of quantum correlation exploiting the detection loophole", *Physics Letters A*, Volume 260, Issue 5, 20 September 1999, Pages 323-327, [https://doi.org/10.1016/S0375-9601\(99\)00519-8](https://doi.org/10.1016/S0375-9601(99)00519-8)

[4] S. Le Corre, « Study about Non-Linear Structures », *Open Access Library Journal*, 2020, 7: e6726. <https://doi.org/10.4236/oalib.1106726>